



Методика согласования динамических характеристик ГТД и топливной автоматики¹

Денисова Е.В., Черникова М.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

В работе представлена методика согласования динамических характеристик ГТД и топливной автоматики для беспилотного летательного аппарата, описана логика ее работы и графически показана взаимосвязь динамической характеристики ГТД, траектории разгона, зависимости частоты вращения ротора турбокомпрессора от времени и зависимости расхода топлива от частоты вращения.

1. Введение

Управление процессом разгона является одной из самых сложных задач, с которой разработчикам системы автоматического управления газотурбинным двигателем (САУ ГТД) приходится сталкиваться при проектировании системы управления короткоресурсным ГТД (КГТД) для беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Следует заметить, что разгоном для КГТД называется процесс от момента нажатия кнопки запуска до выхода на режим стабилизации.

Проблемы, с которыми приходится сталкиваться:

- превышение максимально допустимого значения ускорения ротора двигателя;
- затягивание процесса разгона по времени;
- погасание камеры сгорания в случае избытка или недостатка топлива.

Все вышеперечисленные недостатки связаны, в первую очередь, с тем, что динамические характеристики двигателя и исполнительной (гидравлической) части системы не согласованы между собой. Если для пилотируемого летательного аппарата (ЛА) эта проблема не стоит так остро, поскольку процесс разгона идет под управлением летчика, то

для БПЛА от выбора алгоритма управления разгоном зависит качество функционирования ЛА в целом.

В настоящее время чаще всего используют алгоритм управления разгоном по программе постоянного ускорения ротора ГТД ($\dot{n} = \text{const}$). Именно при использовании такого алгоритма и возникают вышеперечисленные недостатки. Поэтому разработка методологии согласования динамических характеристик двигателя и топливной автоматики является весьма актуальной задачей [1].

Целью данной работы является построение линии автомата разгона, которая согласовывает динамические характеристики ГТД и топливной автоматики, а также предотвращает проблемы, возникающие в ходе работы двигателя.

2. Постановка задачи

Для решения поставленных проблем предлагается использовать динамическую характеристику ГТД, представленную в виде семейства кривых в системе координат (G_t, n, \dot{n}) , где n — частота вращения ротора турбокомпрессора; G_t — расход топлива; \dot{n} — ускорение ротора турбокомпрессора. Динамическая характеристика является графическим отображением статических и динамических свойств ГТД в широком диапазоне режимов работы. Поэтому логичным является использование динамической характеристики для построения линии разгона ГТД для беспилотного летательного аппарата, рассматривая каждое семейство кривых как функцию приведенных переменных n, G_t . Динами-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 1 Отделения ЭММПУ РАН «Научные основы робототехники и мехатроники», РФФИ (грант № 14-08-97027-р_поволжье_a).

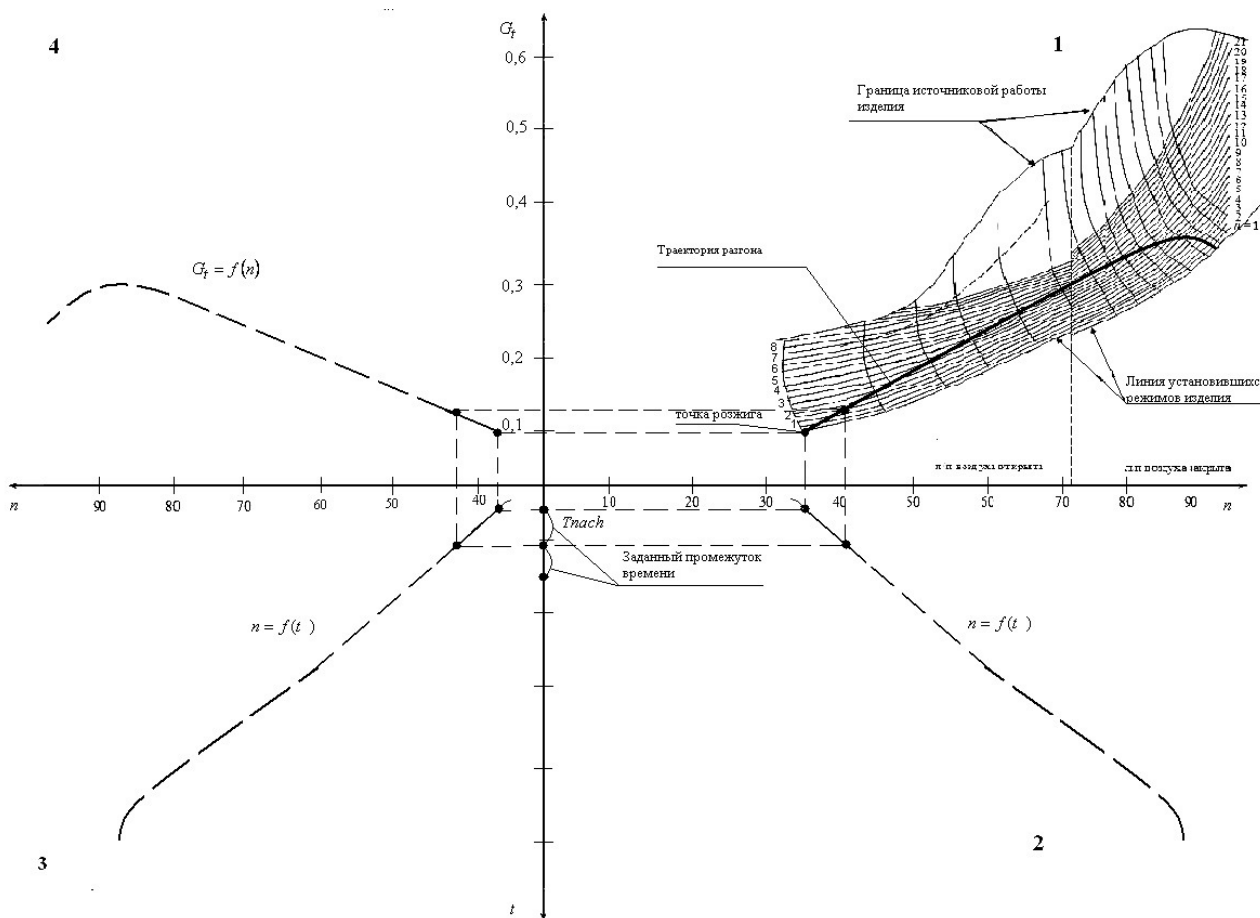


Рис. 1. Взаимосвязь динамической характеристики одновального ГТД, траектории разгона, зависимости частоты вращения ротора турбокомпрессора от времени $n = f(t)$ и зависимости расхода топлива от частоты вращения $G_t = f(n)$

ческая характеристика двигателя строится в плоскости приведенных значений расхода топлива и частоты вращения, и на характеристику наносятся линии постоянных значений ускорений. При этом запуск и разгон осуществляются при земных условиях, поэтому приведенные и физические значения совпадают. Другие параметры, такие как температура, давление, в данном случае не учитываются. Это будет сделано позже.

На рис. 1 представлена взаимосвязь функции значения расхода топлива $G_t = f(n)$ от частоты вращения, а также функции изменения частоты вращения ротора от времени $n = f(t)$, которые обозначены на рисунке пунктирными линиями. На рисунке показан желаемый вид этих функций. Эти две функции взаимосвязаны с графиком динамической характеристики одновального ГТД.

Для представления методики автоматизированного построения линии разгона плоскость построения разделена на четыре квадранта. Первый квадрант представляет собой динамическую харак-

теристику ГТД, то есть функцию частоты вращения ротора турбокомпрессора (n) от расхода топлива (G_t). Такая зависимость представлена в виде $n = f(G_t)$ при $\dot{n} = \text{const}$ (линия постоянных ускорений). На эту характеристику наносим требуемую траекторию разгона, используя которую, строим динамическую характеристику автомата разгона. Во втором квадранте представлена зависимость частоты вращения ротора турбокомпрессора от времени $n = f(t)$, построение этой зависимости происходит в ходе работы двигателя, логика которого будет описана ниже. Третий квадрант представляет собой промежуточную плоскость — через него значение частоты вращения ротора турбокомпрессора от второго квадранта переносится в четвертый, а сама зависимость $n = f(t)$ является зеркальным отображением функции, показанной во втором квадранте. Линия автомата запуска представлена в четвертом квадранте как желаемая функция расхода топлива от частоты вращения ротора $G_t = f(n)$.

Траектория линии разгона представляет собой

матрицу $A = (G_t, n, \dot{n})$, которая описывает необходимые значения расхода топлива G_t и частоты вращения ротора турбокомпрессора n , а также учитывает соответствующие значения ускорения частоты вращения ротора \dot{n} .

Линия траектории разгона начинается в точке розжига (пересечение начальных значений G_t с n при $\dot{n} \neq 0$ в начальный момент времени (T_{nach})). Завершение траектории линии разгона происходит при $\dot{n} = 0$ с выходом расхода топлива и частоты вращения ротора турбокомпрессора на более высокие значения. При этом выбирается траектория разгона из соображений максимально допустимого ускорения так, чтобы не попасть на границу помпажа. Время разгона — по возможности минимальное.

Для решения проблем повышения максимально допустимого значения ускорения ротора двигателя и погасания камеры сгорания в случае избытка или недостатка топлива введен параметр — конструктивно-режимное ограничение траектории разгона \ddot{n} . Этот параметр показывает возможность или невозможность перехода с режима на режим при разгоне и торможении турбокомпрессора. Введение такого параметра обусловлено двумя причинами: при увеличении подачи топлива в камеру сгорания в первое мгновение обороты ротора остаются неизменными, температура газа возрастает резко, а динамическая режимная точка перемещается в направлении границы помпажа; при «сбросе» топлива в первое мгновение обороты также остаются неизменными, температура резко снижается, при этом динамическая режимная точка увеличивает запас по помпажу [2]. Поэтому введение конструктивно-режимного ограничения обусловлено физическими процессами, происходящими в двигателе при его работе, чтобы динамическая режимная точка находилась в пределах траектории разгона.

Логика работы для построения желаемой линии автомата разгона состоит в следующем.

В начальный момент времени T_{nach} двигатель начинает свою работу из точки розжига в первом квадранте. И по матрице траектории $A = (G_t, n, \dot{n})$ находим значения расхода топлива G_{t0} и частоты вращения ротора турбокомпрессора n_0 , а также ускорение ротора турбокомпрессора \dot{n}_0 . Значение расхода топлива этой точки переносится на плоскость четвертого квадранта, а значение частоты вращения ротора в данный момент — на плоскость второго квадранта.

Значение времени показывается во втором и третьем квадрантах и пересекает значение частоты вращения ротора турбокомпрессора в одной точке, которая и будет началом построения зависимо-

сти частоты вращения ротора турбокомпрессора от времени $n = f(t)$. В плоскости четвертого квадранта получена точка, которая является пересечением значения расхода топлива от первого квадранта и значением частоты вращения ротора от третьего. Эта точка — начало построения линии автомата разгона.

Далее, через некоторый фиксированный промежуток времени Δt определяются новые значения расхода топлива G_{t1} и частоты вращения ротора турбокомпрессора n_1 , которые в первом квадранте пересекаются и дают вторую точку на динамической характеристике. При этом величина конструктивно-режимного ограничения траектории разгона \ddot{n} принимает некоторое значение. Значения частоты вращения ротора турбокомпрессора n_1 и ускорения ротора \dot{n}_1 рассчитываются по следующим формулам:

$$n_1 = n_0 + \frac{\ddot{n}_0 \cdot \Delta t^2}{2}, \quad \dot{n}_1 = \dot{n}_0 \cdot \Delta t.$$

Через такой же промежуток времени по матрице траектории $A = (G_t, n, \dot{n})$ находим значения расхода топлива, частоты вращения и ускорения ротора, а также конструктивно-режимное ограничение.

Полученная расчетная точка может располагаться выше, ниже или совпадать с линией траектории разгона. Если полученная точка совпадает с линией траектории разгона, то продолжают вычисления дальше. Иначе необходимо учитывать значение конструктивно-режимного ограничения траектории разгона \ddot{n} . Это значение покажет возможность или невозможность перехода с режима на режим.

Аналогично находим следующие значения расхода топлива, частоты вращения ротора турбокомпрессора, ускорения ротора, конструктивно-режимного ограничения траектории разгона, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$n_2 = n_1 + \dot{n}_1 \cdot \Delta t + \frac{\ddot{n}_1 \Delta t^2}{2}, \quad \dot{n}_2 = \dot{n}_1 + \ddot{n}_1 \Delta t, \\ \ddot{n}_2 = \frac{\dot{n}_2 - \dot{n}_1}{\Delta t}.$$

Расчеты проводятся до тех пор, пока не будут пройдены все значения траектории разгона и до тех пор, пока не будет получена линия автомата разгона для дальнейшей работы двигателя.

3. Заключение

В данной работе представлена методика построения линии автомата разгона, которая согласовывает динамические характеристики ГТД и топливной автоматики. Разработанная методика поз-

воляется решить следующие проблемы: превышение максимально допустимого значения ускорения ротора двигателя, затягивание процесса разгона по времени, погасание камеры сгорания в случае избытка или недостатка топлива. Для этого предложена желаемая траектория разгона и введен дополнительный параметр — конструктивно-режимное ограничение траектории разгона, что помогает в решении поставленных проблем.

Список литературы

- [1] Кусимов С.Т., Ильясов Б.Г., Васильев В.И. и др. Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД. М.: Машиностроение, 1999. 609 с.
- [2] Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 296 с.